工作機械における形状創成理論の体系化と応用*

稲 崎 一 郎^{*1}Theory of Generating Motion for Machine Tools
(Formulation and Application)

Ichiro INASAKI

Key Words: Machine Tool, Generating Motion, Measurement, Accuracy, Numerical Control

1. 序 言

工作機械に要求される最も重要な性能の一つは、マザーマシンとしての加工精度の高さである。工作機械の加工精度は、工具と加工物間の創成運動を実現するための各種構成要素間の相対運動の精度にまず左右される。これに加えて、加工中に構造に作用する力や熱による変形の程度に左右される。後者に関しては、工作機械の剛性、および熱変形特性としてこれまでに多くの研究が行われ、工作機械の加工精度向上がなされてきた。しかしより基本的な因子である工作機械の形状創成運動に関しては、不思議なことにこれまであまり体系だった研究が行われていなかった。

工作機械の創成運動を分析することは、その運動精度を検討するためでなく、構造設計をする上でも必要なことである。工作機械の構造設計に関しては、これまでに Salje⁽¹⁾⁽²⁾、伊東^{(3)~(7)}によって有用な提案がなされている。しかしこれらの研究の主眼は、工作機械の構造記述法の提案に始まって構造の創成法を論ずるところにあり、例えば創成運動における誤差の問題等を定量的に扱おうとしているものではない。一方、工作機械形状創成運動の数学モデルを構築しようとする試みが Portman⁽⁸⁾、杉村^{(9)~(15)}によって始められ、その運動精度を定量的に検討することを可能とした。

岸浪⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾および著者⁽¹⁸⁾は、これら研究の有用性に注目し、主として工作機械の誤差解析ならびに誤差補正への応用を目的とした研究を行ってきた。また、

近年注目を集めている5軸制御工作機械の構造評価や加工ソフトウェアの開発にも創成運動の数学モデルは効果的に応用されるはずであり、竹内^{(19)~(22)}および著者^{(23)~(25)}は後者に関して一連の研究成果を発表している。

以上概説したように、創成運動の数学モデル化は、工作機械の構造設計、誤差補正、さらに加工ソフトウェアの開発上極めて有用な手法である。そこで本稿では、形状創成運動理論の基礎と応用に関する研究状況を展望し、読者の参考に供したいと思う。

2. 形状創成運動の数学モデル⁽⁸⁾

形状創成運動の数学モデルを構築するために、工作機械を図1に示したように、加工物から始まって工具で終わる剛体の連鎖と考える。各要素に固有の座標系 $S_i (i=0, 1, \dots, l)$ を与えると、工作機械の形状創成運動は、各座標系間の相対運動 k_i の重畳とみなすことができる。

構成要素を剛体と仮定すると、要素間の相対運動は直交座標系の各座標軸に平行な並進運動 X, Y, Z と、

図1 工作機械の数学モデル

* 原稿受付 平成6年2月8日。

*1 正員、慶應義塾大学理工学部(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

各座標軸回りの回転運動 A, B, C となるが、これらをそれぞれ 1 から 6 までの数字で記述する。隣接する要素 S_{i-1} と S_i 間の相対運動はこれら数字のいずれかで表現されることになる。この数字を工作機械構成要素の連鎖の順に並べた

$$k = k_1 k_2 \cdots k_i \cdots \cdots (1)$$

を座標コードと呼ぶ。これにより、それぞれの工作機械の創成運動を特徴づけることができる。

各要素間の相対運動に対応した同次座標変換(表 1)を順次行うことにより、工具の座標系 S_i における工具加工点の位置ベクトルは、最終的に加工物の座標系 S_0 に変換される。よって工具と加工物の相対運動、すなわち形状創成関数は

$$r_0 = A_i A_j \cdots A_i \cdots A_i r_i \cdots \cdots (2)$$

で表される。ここで、 $A_j (j=1 \sim 6)$ は 6 種類の相対運動に対応する同次座標行列で、 r_i は工具加工点の位置ベクトルである。

実際には、各構成要素間には各軸に沿う並進運動誤差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ と各軸回りの回転誤差 α, β, γ が存在する。各誤差の量が微小で加算可能であると仮定すると、これら誤差の影響は次の誤差行列によって考慮される。

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma & \beta & \delta_x \\ \gamma & 0 & -\alpha & \delta_y \\ -\beta & \alpha & 0 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdots \cdots (3)$$

形状創成関数に、必要に応じて誤差行列を代入すれば誤差が加工精度に及ぼす影響を検討することが可能となる。

表 1 同次座標変換行列

	相対運動	同次座標変換行列
並進運動	X 軸	1 $A^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
	Y 軸	2 $A^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
	Z 軸	3 $A^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
回転運動	X 軸	4 $A^4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
	Y 軸	5 $A^5 = \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
	Z 軸	6 $A^6 = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

以上が形状創成理論の根幹である。座標コードの順列組合せを考えることによって、種々の工作機械構造構成の可能性を系統立てて検討することができる。また、誤差を考慮に入れた形状創成関数に基礎を置き、工作機械加工精度の評価、誤差因子の同定、さらには誤差の補正法等を検討することが可能となる。

3. 工作機械構造の多様性の検討と 基本構造設計への応用

各構成要素間の相対運動を想定し、形状創成関数を計算すると、加工後の工作物形状を求めることができる。この流れを順方向とすると、逆方向の流れを考えることによって、ある要求された形状を加工するのに必要な工作機械の創成運動、さらにその構造を検討することができ、構造設計上有用な指針となる。もちろん、この逆問題において、要求を満足する解はユニークには定まらず、実際の応用においては適切な拘束条件や評価関数を定める必要がある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。さらに、知識工学的手法と結合させて、従来からの工作機械設計上の経験則を生かした構造設計法も提案されている^{(4)~(6)(13)}。これらは、工作機械構造の CAD を現実的なものとする上で有用である。

工作機械構成要素の中には、例えばベッドのように運動しない固定要素が存在する。このような固定要素の位置を座標コード中に明示することにより、実際の工作機械の構造構成を表現することができる。例えば図 2 に示したよく知られた旋盤を例にとると、その構成は 6/0/3/1 というコードで表現される。ここで 0 は固定要素の位置を示しており、それが Z 軸回りの回転運動 6 (切削運動) と Z に沿った直進運動 3 (テーブルの送り運動) の間に存在することを示している。旋盤構造の多様性を検討するには、この 4 けたのコードの順序を入れ換えてみればよい。これより、 $4! = 24$ とおりの可能性のあることがわかるが、実際に旋盤としてその機能を発揮できるのはその中の 12 とおりである。残りの 12 とおりは、切込み運動を行うと、加工物の中心軸と切削回転運動の中心軸が一致しなくなり(例え

図 2 代表的な旋盤構造

ば0/3/1/6の構成), 円筒の外周形状が加工できなくなる(加工が可能であるか否かも, 形状創成関数を利用して証明することが可能である)。しかしながら, 従来からよく知られている普通旋盤の構成の他にも, 11とおりの構成が可能であることは注目に値する。工作機械創成運動のコード化は, このようにその基本構成の可能性を系統的に検討して行く上で有用なのである。

上述した構造構成の多様性の検討に関しては, 5軸制御工作機械のように運動要素が多くなるとコード化と形状創成関数の有用性がさらに増してくる。この場合には $6!=720$ とおりもの可能性がまず計算される。しかしこれら全てが5軸制御工作機械として機能するわけではない。5軸制御工作機械としての基本的な機能, すなわち, 加工物の五つの面全てに対して工具軸を向けることができるのはこれらの中のいくつかである。検討すべき対象の数が極めて多いため, 機能を満足する構造を検討するには計算機の助けが必要となる。ここで形状創成関数が効果的に利用される⁽²³⁾。図3に示したテーブル旋回・傾斜型5軸マシニングセンタを例にとり, 図4に示した2とおりの場合を比較してみよう。構造(a)の場合はX軸とZ軸回りにテ

ーブルを回転させることによって加工物の5面に工具の軸を向けることが可能であるが, (b)の場合は不可能である。4と6の運動の順序を入れ換えただけで, 一方は5軸制御工作機械として機能しなくなるのである。このことは, 工具軸がZ軸と平行であるとして計算した形状創成関数が,

構成(a)に対して:

$$\mathbf{r} = \{-\sin \varphi \sin \theta, -\sin \varphi \cos \theta, -\cos \varphi, 0\}^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

構成(b)に対して:

$$\mathbf{r} = \{0, \sin \varphi, -\cos \varphi, 0\}^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

となることによって証明される。すなわち(b)の構成においては, テーブルをいかに旋回させても, あらかじめ加工物に設定された座標系でのX軸方向に工具軸を向けることができないのである⁽²³⁾。

4. 工作機械に存在する誤差の評価, 同定, および補正への応用

工作機械の加工精度を低下させる要因の第一は, 構成要素の幾何学的誤差, および組立誤差である。誤差を考慮に入れた形状創成関数を扱うことにより, これら誤差が創成運動誤差に及ぼす影響を定量的に検討することが可能となる。これにより, 運動誤差の観点から工作機械の構造評価を行うことが可能である。以下

図3 テーブル旋回・傾斜型5軸マシニングセンタ

図5 立形マシニングセンタの構成例

(a) 5面加工が可能な構造 (b) 5面加工が不可能な構造

図4 5面加工の確認

図6 加工誤差のシミュレーション

にその一例を示そう。

図5は立軸マシニングセンタの四種類の構成例を示している。それぞれに仮定された代表部分の寸法、ならびに誤差を同じとして、 X - Y 平面上の運動を行わせたときの Z 軸方向誤差を計算機シミュレーションによって求めた結果が図6である。これより、図5における(c)、(d)の構成が X - Y 平面の加工においては有利であることがわかる⁽¹⁸⁾。また、加工物に許容される誤差をまず仮定し、これを満足するために工作機械に許される誤差の決定、および各部への誤差の配分等を論ずることも可能である⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

形状創成理論の有効な応用分野として、工作機械に内在する誤差の同定が挙げられる。これには二種類の方法が考えられる。一つは、加工終了後の部品形状を三次元測定機等で計測し、加工誤差発生の原因となっている箇所を特定する方法である。他の一つは、ある種の計測機を使用し、工作機械に特定の運動をさせた際に検出される運動誤差から推定する方法である。前者の方法に関しては、岸浪ら⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾が旋盤や立軸フライス盤に対して試行している。これら二つの方法には一長一短がある。加工を伴う方法は、特別な計測装置を必要としない長所がある反面、加工に伴う各種の外乱を受ける問題点がある。

一方後者に関しては、Double-Ball-Bar (DBB) を用いて5軸制御マシニングセンタの組立誤差を推定しようとする著者らの試みがある⁽²⁴⁾。提案している方法の原理は、工具-加工物間の相対距離を一定に保つように設定されたプログラムによって工作機械を運動させ、DBBで検出される相対変位から誤差発生原因を特定しようとするものである。図7に示したように、

図7 DBBを使用した5軸マシニングセンタの誤差検出

例えばDBBを X に平行となるように設定し、 A 軸の工具旋回運動および Z 軸と Y 軸方向の並進運動の三運動を組合せた運動をさせる。もし工作機械に誤差がなければDBBのバーは伸縮しないが、誤差があればバーは伸縮することになる。バーの方向を他の座標軸方向にも向けて同種の操作を繰り返すことにより、いくつかの誤差要因を特定することができる。

上述したいずれの方法を利用するにしても、工作機械に内在する全ての誤差要因を特定できるわけではない。これまでに主として対象とされているのは、直角誤差等の組立誤差である。これら誤差の同定を行おうとする目的は、再調整によって工作機械の誤差を取り除くこと、あるいは検出された誤差をその工作機械固有のものとしてとらえ、NCプログラムによって加工運動を修正しようとするにある。

5. 多軸制御加工用ソフトウェア開発への応用

形状創成理論の最も直接的な応用分野の一つは、複雑な運動をする多軸制御工作機械のプログラミングである。竹内ら^{(19)~(22)}は、与えられた工具経路から各種構造の5軸制御マシニングセンタを動かすためのポストプロセッサを開発するために本理論を適用している。

複雑な創成運動が要求される加工の他の例として、

構成要素	同次座標変換行列
A軸	$A^5(d\phi)$
U軸	$A^2(dx)$
W軸	$A^6(w)$
Y軸	$A^2(Y)$
Z軸	$A^3(z)$

図8 工具研削盤の構成

(a) 加工すべき切削工具の断面形状 (b) 砥石断面形状

図9 工具研削における砥石断面形状の決定

工具研削がある。これはドリルやエンドミルカッタのねじれ溝部を砥石で成型研削する加工である。図8に示したように多くの制御軸が必要とされるが、加えて砥石の断面形状も当然のことながら形状創成関数の中に考慮しなければならない。このプロセスで実際に要求される課題の一つは、要求された切刃断面形状をもつ工具を加工するに必要な砥石断面形状を決定することである。すなわち、形状創成関数を逆方向に解析することが要求される。著者らは、加工物および砥石の断面形状を離散化することにより、上述の要求に答えるソフトウェアを開発した⁽²⁵⁾。図9は出力結果の一例である。

6. 結 言

工作機械の基本構造設計、精度検査、誤差補正、さらに加工用ソフトウェアの開発等にその応用が期待される形状創成理論に関し、その基礎といくつかの応用例を紹介した。理論の基本は、すでにロボット工学の分野では一般的に用いられているものであるが、工作機械の研究・開発の分野でもその体系化と応用に関心がもたれはじめているのが現状である。工作機械と同様な運動をする三次元測定機の分野にも効果的な応用が期待されることはいうまでもない。

本稿が工作機械の研究・開発にたずさわっている諸氏の御参考になれば幸いである。

文 献

- (1) Saljé, E. and Redeker, W., *Proc. 4th Int. Conf. on Prod. Eng.*, (1980), 386, Tokyo.
- (2) Saljé, E., Böckem, J., Döpcke, H., Puttkammer, K. and Redeker, W., *ZwF*, 68-8 (1973), 404.
- (3) 伊東・新野, 機論, 46-405, C (1980), 562.
- (4) 新野・伊東, 機論, 50-449, C (1984), 213.
- (5) 新野・伊東, 機論, 50-459, C (1984), 2192.
- (6) 新野・伊東, 機論, 52-474, C (1986), 788.
- (7) Saito, Y. and Ito, Y., *Proc. 22nd Int. MTDR Conf.*, (1981), 69.
- (8) Reshetov, D. N. and Portman, V., *Accuracy of Machine Tools*, (1988), 21, ASME Press.
- (9) 杉村・岩田・大場・牧之内, 機論, 47-418, C (1981), 793.
- (10) 岩田・大場・杉村, 機論, 51-467, C (1985), 1638.
- (11) 岩田・杉村・彭, 機論, 54-503, C (1988), 1614.
- (12) 岩田・杉村・彭, 機論, 55-510, C (1989), 470.
- (13) 岩田・杉村・彭, 機論, 56-523, C (1990), 803.
- (14) 森脇・杉村・苗・岩田, 機論, 57-542, C (1991), 3372.
- (15) 森脇・杉村・苗, 機論, 59-564, C (1993), 2564.
- (16) Kishinami, T., Tanaka, F. and Yamada, M., *Proc. ASPE Annual Meeting*, (1993), 358.
- (17) Tanaka, F., Kishinami, T. and Yamada, M., *Trans. of the IMACS/SICE Int. Symp. Robotics, Mech. Manuf. Sys.*, (1992), 687, Kobe.
- (18) 春本・稲崎, 精密工学会誌, 59-6 (1993), 915.
- (19) 竹内・清水・出村・渡辺・伊藤, 精密工学会誌, 56-11 (1990), 2063.
- (20) 出村・竹内, 精密工学会誌, 57-11 (1991), 1989.
- (21) 竹内・渡辺, 精密工学会誌, 58-9 (1992), 1586.
- (22) 竹内・久木・横山・渡辺, 精密工学会誌, 59-9 (1993), 1465.
- (23) 坂本・稲崎, 機論, 59-561, C(1993), 1553.
- (24) 坂本・稲崎, 機論, 60-575, C(1994), 掲載決定.
- (25) Matsumoto, M. and Inasaki, I., *Proc. The 1st China-Japan Int. Conf. Prog. Cutting and Grinding*, (1992), 239, Pekin.